Journal of Agricultural Machinery
Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 4, 2023, p. 477-491

A Multi-Objective Optimization to Determine The Optimal Patterns of Sustainable Agricultural Mechanization Using NSGA-II Algorithm

M. A. Hormozi[1], H. Zaki Dizaji[2*], H. Bahrami[2], N. Monjezi[3]

1- PhD Student in Agricultural Mechanization, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: hzakid@scu.ac.ir)

Received: 10 August 2022 Revised: 05 November 2022 Accepted: 09 November 2022 Available Online: 09 November 2022	**How to cite this article:** Hormozi, M. A., Zaki Dizaji, H., Bahrami, H., & Monjezi, N. (2023). A Multi-Objective Optimization to Determine The Optimal Patterns of Sustainable Agricultural Mechanization Using NSGA-II Algorithm. *Journal of Agricultural Machinery*, *13*(4), 477-491. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.78147.1118

Introduction

The development of mechanization and machine technology can have positive and negative effects on the economic, social, and environmental conditions of a region. Conflicts in these areas complicate the selection and optimization of sustainable mechanization systems. One of the basic questions in the selection of a sustainable agricultural mechanization system is how and with what methodology would it be possible to propose the closest mechanization model that will overcome the simultaneous contradictions between the three pillars of sustainability; taking into account the natural and technical limitations in agricultural production. What is the appropriate approach considering the economic, environmental, and social aspects? The current research aims to provide a framework for an optimal mechanization model to achieve the goals of agricultural sustainability so that it can be implemented and applied practically. It is possible to provide a model that addresses the conflicting economic, social, and environmental aspects by quantitatively optimizing the level of mechanization.

Materials and Methods

In this study, a framework is applied whereby contradictory goals of agricultural sustainability can be achieved simultaneously. After selecting the indices and data collection, by combining Shannon entropy and TOPSIS, the similarity index was obtained for each objective. The similarity indices and values of the Benefit-Cost Ratio calculated for each system were considered as coefficients of three objective (economic, social, and environmental) functions in multi-objective optimization. The multi-objective optimization model was applied to achieve sustainable mechanization patterns and was solved using the NSGA-II algorithm. For framework validation, paddy production mechanization systems in the Ramhormoz region located in southwestern Iran were analyzed with constraints: land, water, and machinery. The five mechanization systems of paddy production included puddled transplanted, un-puddled transplanted, water seeded, dry seeded, and, no-till.

Results and Discussion

Pareto-optimal solutions of different scenarios with water and machine constraints showed that this framework cannot only meet the sustainable goals, but also the optimal allocation of mechanization systems is identified and the effect of different scenarios under different constraints can be examined. The sustainability goals between the no-tillage and planting with puddling systems are highly contradictory. The no-tillage system has the highest score in the environmental aspect and the lowest score in the social and economic aspects. This modern system was developed in Ramhormoz three years ago and has faced technical, economic, and social

https://doi.org/10.22067/jam.2022.78147.1118

challenges ever since. The cultivated area using this system was 43 hectares in 2019. Despite the speed and ease of planting with this system, and its direct environmental benefits, the possibility of fungal outbreaks is raised due to the presence of wheat residues from previous cultivation and the warm and humid environment of cultivation. Additionally, weed outbreaks caused by periodic irrigation have greatly affected the satisfaction and profitability of this system, leading to the highest amount of pesticides consumed among the studied systems. The results of multi-objective optimization of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz city showed that the total surface area of optimal point systems is in the range of 2700 to 3200 hectares, which is close to the area under rice cultivation in Ramhormoz (3310 hectares) and it indicates that the output of the model is according to the applied restrictions and close to reality. The limitation of machinery and water has made the two planting systems of un-puddled transplanting and dry-seeding better than other systems. Removing only the machinery restriction can lead to an increase in the area under rice cultivation by about 700 hectares. This means that the requirement for the development of sustainable rice cultivation in Ramhormoz is to strengthen and support modern mechanized systems of no-tillage, dry-seeding, and planting with puddling, with a focus on systems with less water consumption which are the systems with higher levels of mechanization. Without water limitation, if the model is subject to the current machinery limitations, the optimal mechanization systems are the more traditional ones such as transplanting without puddling and wet-seeding.

Conclusion

One of the most fundamental challenges in the development of mechanization is identifying systems that can best balance the economic, social, and environmental aspects of sustainability and minimize environmental damage whilst maximizing economic and social benefits. Using the framework for sustainable mechanization will not only accomplish sustainable goals in identifying the optimum agricultural mechanization level, but it will also allow researchers and implementers in the agricultural sector to examine the outcome of various scenarios under different constraints. This framework can be used to find the optimal model for mechanization of all stages of tillage, planting, harvesting, and post-harvest in diverse geographical areas.

Keywords: Agricultural mechanization, Multi-objective optimization, Optimal pattern, Sustainability

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ٤، زمستان ١٤٠٢، ص ٤٩١-٤٧٧

بهینه‌سازی چندهدفه جهت تعیین الگوهای بهینه‌ی عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک با استفاده از الگوریتم NSGA-II

محمد علی هرمزی[۱]، حسن ذکی دیزجی[۲*]، هوشنگ بهرامی[۲]، نسیم منجزی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

چکیده

توسعه مکانیزاسیون و فناوری ماشینی پیامدهای مثبت و نامطلوب بسیاری را با توجه به شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی هر منطقه در پی خواهد داشت. تعارضات به‌وجود آمده در این ابعاد، انتخاب و سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار را بحث‌برانگیز و مشکل می‌کند. هدف از این مطالعه، مدل‌سازی چندهدفه جهت تعیین الگوهای بهینه عملیات تهیه زمین و کاشت شلتوک و ارائه چارچوبی جهت تخصیص مکانیزاسیون به اهداف متناقض پایداری کشاورزی است. بر این اساس، پس از انتخاب شاخص‌ها و جمع‌آوری داده، با ترکیب روش‌های وزن‌دهی آنتروپی شانون و TOPSIS، شاخص شباهت برای ابعاد چند شاخصه محاسبه شد و این شاخص شباهت به همراه مقادیر شاخص‌ها به‌عنوان ضرایب توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شد. مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از الگوریتم NSGA-II ارائه شد. جهت اعتبارسنجی این چارچوب، پنج سیستم مکانیزاسیون (خاک‌ورزی و کاشت) در تولید شلتوک شهرستان رامهرمز با محدودیت‌های زمین، آب و ماشین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در صورت عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ بهینه هستند و در شرایط خشک‌سالی و محدودیت شدید آب سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری، بی‌خاک‌ورزی (با عملکرد مطلوب) و نشاکاری با پدلینگ به‌عنوان سیستم‌های بهینه پایدار خواهند بود. جواب‌های بهینه پارتو تحت سناریوهای مختلف در محدودیت‌های آب و ماشین نشان داد با به‌کارگیری این چارچوب، نه‌تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف نیز وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه، پایداری، مکانیزاسیون کشاورزی

مقدمه

مکانیزاسیون تمام سطوح فناوری‌های تولید و فرآوری از ابزاردستی ساده تا تجهیزات موتوری و پیچیده را شامل می‌شود که باعث کاهش سختی کار، برطرف شدن مشکل کمبود کارگر، بهبود بهره‌وری و انجام به‌موقع عملیات کشاورزی، بهبود استفاده مؤثر از منابع، دسترسی بهتر به بازار و مشارکت در کاهش خطرات تغییر اقلیم می‌گردد. مکانیزاسیون پایدار هنگام مشارکت در توسعه پایدار بخش غذا و کشاورزی، جنبه‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و فرهنگی را در نظر می‌گیرد (FAO, 2022).

بدین‌منظور در قالب چارچوب توسعه پایدار، در تحلیل مکانیزاسیون کشاورزی سه جنبه باید دیده شود. جنبه اقتصادی که به افزایش عملکرد، ارزش‌افزوده و درآمد بالاتر اشاره دارد. جنبه اجتماعی که می‌بایست مکانیزاسیون در بستر اجتماعی دیده شود و به منافعی مانند کاهش سختی کار و افزایش زمان فراغت و اشتغال توجه کند. جنبه زیست‌محیطی که به نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند تخریب منابع طبیعی رسیدگی می‌کند (Sims, Hilmi, & Kienzle, 2016;

۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hzakid@scu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.78147.1118

(Mishra & Satapathy, 2022). برای توسعه پایدار و پایداری تولید محصول، می‌بایست مفهوم پایداری در مکانیزاسیون را تبیین کرد. مکانیزاسیون کشاورزی پایدار را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: مکانیزاسیونی که از نظر اقتصادی ممکن[1]، از نظر زیست‌محیطی حساس[2] و از نظر اجتماعی مقبول[3] باشد (Sims & Kienzle, 2016).

در اصول اولیه انتخاب سیستم‌های مکانیزه کشاورزی روابط، روش‌ها و مدل‌های بسیاری ارائه شده است که عمده تمرکز مطالعات انجام‌گرفته بر تحلیل فنی و اقتصادی بوده است. در این زمینه، می‌توان در انتخاب تراکتور و توان مورد نیاز و در انتخاب تجهیزات مناسب براساس توان در دسترس تراکتور یا زمان مورد نیاز اشاره کرد (Bochtis, Sørensen, & Busato, 2014; Bochtis, Sørensen, & Kateris, 2019). سوپیا و اکوازیچ (Cupiał & Kowalczyk, 2020) نیز جهت کمینه‌سازی[4] هزینه‌ها و بهترین ترکیب ماشین‌ها در مزرعه یک پلتفرم را طراحی کردند.

در برخی پژوهش‌ها از برنامه‌ریزی ریاضی[5] و تحلیل سلسه‌مراتبی[6] برای انتخاب و مدیریت ماشین‌ها استفاده شده است که در آن‌ها گاهی عوامل زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در نظر گرفته شده است. با این‌وجود، در زمینه کاربرد مکانیزاسیون حداقل یک بعد از ابعاد پایداری مغفول مانده است. کمرانا و همکاران (Camarena, et al., 2004) برای کمینه‌سازی هزینه سالانه مکانیزاسیون مدلی را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی[7] برای سیستم‌های مزارع چند کشتی ارائه کردند؛ که براساس آن اندازه ماشین‌ها محاسبه گردید. در پژوهشی برای تعیین دیدگاه‌های مهم در انتخاب تراکتورهای کشاورزی یک تکنیک ترکیبی از AHP و TOPSIS[8] ارائه شد (García-Alcaraz et al. 2016). کشوری و مرزبان (Keshvari & Marzban, 2019) نیز توان تراکتوری موردنیاز شهرستان‌های استان خوزستان را در زمان اوج عملیات کشاورزی با استفاده از روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی فازی محاسبه نمودند. ژو و همکاران (Zhou et al. 2011) به دنبال بهینه‌سازی انتخاب ماشین‌های کشاورزی بوده‌اند و با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و فازی روشی برای پیدا کردن بهترین ماشین از منظر زیست‌محیطی ارائه کردند. کوریتز (Koritz 2014) با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه و ارزیابی چرخه حیات[9] ماشین‌های کشاورزی با کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی بهترین گزینه‌های ماشین‌ها را به‌دست آورد. امامی و همکاران (Emami et al. 2018) جهت اولویت‌بندی سیاست‌گذاری توسعه مکانیزاسیون کشاورزی با توجه به امنیت غذایی در ایران از تحلیل SWOT به کمک روش‌های TOPSIS و AHP استفاده کردند.

برخی تحقیقات به ارزیابی پایداری در طراحی و ساخت ماشین‌های کشاورزی پرداخته‌اند. در پژوهشی رهیافت‌های طراحی پایداری محور[10] مورد آزمایش قرار گرفت و طی فرآیند طراحی، توسعه، ساخت، فروش، کاربرد، تعمیر و نگهداری و اسقاط کردن هر سه بعد پایداری به‌طور یکپارچه مورد ارزیابی قرار گرفت (Banerjee & Punekar, 2020). بزروک و همکاران (Bezruk, et al., 2014) ارزیابی پایداری با استفاده از نظرات کشاورزان در مراحل طراحی، ساخت و تعمیر و نگهداری ماشین‌های کشاورزی و کورتی و همکاران (Corti et al., 2013) مدل‌های تجاری را برای سازندگان ماشین‌های کشاورزی برای بهبود پایداری مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین کثرن هاردی (Gathorne-Hardy, 2016) یک ارزیابی پایداری مقایسه‌ای سیستم‌های تراکتوری و حیوانی را انجام دادند. رومانلی و میلان (Romanelli & Milan, 2012) کاربرد و مدیریت ماشین‌های کشاورزی را با استفاده از جریان مواد مورد ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی قرار داده است.

با این‌حال، تعداد مطالعاتی که از شناسایی اثرات مخرب مکانیزاسیون کشاورزی و خدمات اکوسیستم[11] مربوط به آن بر روی پایداری زیست‌محیطی و اجتماعی- اقتصادی صورت‌پذیرفته بسیار کم هستند (Banerjee & Punekar, 2020; Kiani et al., 2022). این در حالی است که پیوندهایی بین شیوه‌های مکانیزه و پایداری کشاورزی، به‌ویژه در رابطه با عملکرد زیست‌محیطی وجود دارد. لیوا و موریس (Leiva & Morris, 2001) با ارائه ۹ مجموعه شاخص شامل: انرژی، آلودگی هوا، فشردگی خاک، آبشویی نیترات، آبشویی آفت‌کش، مواد آلی خاک، ایمنی و سلامت در مزرعه، اشتغال و عملکرد مالی، این ارتباطات را نشان داده‌اند. این پژوهشگران اعلام کرده‌اند که گرچه امکان شناسایی میزان شاخص‌های مرتبط با مکانیزاسیون وجود دارد اما تعریف مقادیر بحرانی برای این شاخص‌ها به‌منظور تعیین این‌که آیا شیوه‌های مکانیزه، کاملاً پایدار هستند، امکان‌پذیر نیست.

از این‌رو یکی از سؤالات اساسی در انتخاب مکانیزاسیون کشاورزی پایدار این است که چگونه می‌توان با توجه به

1- Feasible
2- Sensitive
3- Acceptable
4- Minimization
5- Mathematical Programing
6- Analytical Hierarchy Analysis
7- Linear Programing
8- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

9- Life cycle assessment
10- Sustarnobity– orienthing design
11- Service ecosystem

محدودیت‌های طبیعی و فنی، نزدیک‌ترین الگوی[۱] مکانیزاسیون به اهداف پایداری را پیشنهاد داده و به تناقضات هم‌زمان سه بعد – اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی– پایداری رسیدگی کرد؟

پژوهش حاضر درصدد است چارچوبی را ارائه دهد که بتوان در قالب آن به الگوی مکانیزاسیون بهینه جهت دستیابی به اهداف پایداری کشاورزی دست یافت به‌طوری‌که به شکل عملی قابل‌اجرا و کاربرد باشد و بتوان مدلی را ارائه داد که سطوح بهینه سیستم‌های مکانیزه را ارائه نماید. برای اعتبارسنجی این چارچوب نیز مطالعه موردی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی–کاشت) در منطقه رامهرمز صورت می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

چارچوب کلی اجرای مطالعه

جهت رسیدگی به مسئله مکانیزاسیون کشاورزی پایدار و حل آن با در نظر گرفتن تعارضات و تناقضات هم‌زمان ابعاد پایداری چارچوبی ارائه می‌گردد که به‌وسیله داده‌هایی که بر مبنای سیستم‌های تولید برنج (خاک‌ورزی و کاشت) برداشت شده است به حل آن می‌پردازد.

سطوح بهینه سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک در منطقه رامهرمز در استان خوزستان طبق چارچوب کلی نشان داده شده در شکل ۱ با ترکیب روش‌های آنتروپی شانون، TOPSIS و الگوریتم NSGA-II انجام شده است. بر این اساس، شاخص‌های منتخب در هر بعد با استفاده از روش آنتروپی شانون وزن‌دهی می‌شوند. با استفاده از روش TOPSIS، شاخص شباهت برای سیستم‌های مکانیزاسیون و به همراه مقادیر به‌دست‌آمده برای ابعاد تک شاخصه به‌عنوان ضرایب تابع هدف در مدل در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی چندهدفه اقتصادی–اجتماعی–زیست‌محیطی ارائه و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی، سطوح عملیات هر سیستم را که بهترین شرایط ابعاد سه‌گانه پایداری را داشته باشند نشان می‌دهند.

منطقه موردمطالعه

داده‌برداری، از سطح شهرستان رامهرمز در شرق استان خوزستان با ارتفاع از سطح دریا ۱۶۰ متر صورت گرفت. آب‌وهوای رامهرمز گرم بوده و رودخانه اعلاء از رامهرمز می‌گذرد. براساس گزارش شفاهی کارشناسان جهادکشاورزی شهرستان رامهرمز، در سال زراعی ۹۹ سطح زیر کشت تابستانه ۵۶۴۲ هکتار بوده است به‌طوری‌که سطح زیر کشت برنج ۳۳۱۰ هکتار بوده است.

سیستم‌های مکانیزاسیون تولید شلتوک شهرستان رامهرمز منتج از ترکیب روش‌های متنوعی است که در مدیریت بقایا در مراحل خاک‌ورزی، کاشت و آبیاری به‌کار می‌روند. در سیستم «نشاکاری بدون پدلینگ» زمین اصلی قبل از نشاکاری دستی، خاک‌ورزی و مرزبندی شده و پس از غرقاب شدن کرت‌ها، مرزها توسط کارگرها محکم و سطح کرت‌ها صاف می‌شود. در مقابل، سیستم «نشاکاری با پدلینگ»، تولید نشاکاری یک تغییر مهم در تهیه زمین با به‌کارگیری پادلر[۲] در شهرستان رامهرمز رخ داده است. خاک‌ورزی در سیستم «آب‌کاری» مشابه نشاکاری بدون پدلینگ است، اما روش کاشت آن به‌صورت مستقیم و با بذرپاشی دستی صورت می‌گیرد. در سیستم «خشکه‌کاری»، بذور خشک در بستر خشک، به شکل مستقیم و مکانیزه به‌وسیله خطی‌کار کاشته می‌شوند. آبیاری به‌صورت تناوبی انجام می‌شود. جدیدترین سیستم در منطقه، «بی‌خاک‌ورزی» است که مشابه خشکه‌کاری است. در این سیستم، بذور توسط کارنده ویژه بی‌خاک‌ورزی در بستر خشک خاک در بین بقایای محصول قبل (غالباً گندم) کاشت می‌شود (Hormozi *et al.*, 2012; Hormozi, *et al.*, 2016).

جمع‌آوری و اندازه‌گیری شاخص‌ها

بررسی وضعیت برنج‌کاری و جمع‌آوری داده‌های آماری کشت برنج و وضعیت تأمین آب کشاورزی با مراجعه به اداره امور آب شمال‌شرق و اداره جهادکشاورزی شهرستان رامهرمز جمع‌آوری شدند. تکمیل پرسشنامه‌ها از طریق جلسات حضوری و تلفنی با کشاورزان و ماشین‌داران انجام شد که به‌ترتیب ۱۱۷ و ۲۴ پرسشنامه مربوطه تکمیل شد. جهت ارزیابی قابلیت اعتماد پرسشنامه در این تحقیق از آزمون آلفای کرونباخ[۳] استفاده شد که مقدار آن ۰/۷۳ به‌دست آمد.

شاخص‌های مورد بررسی

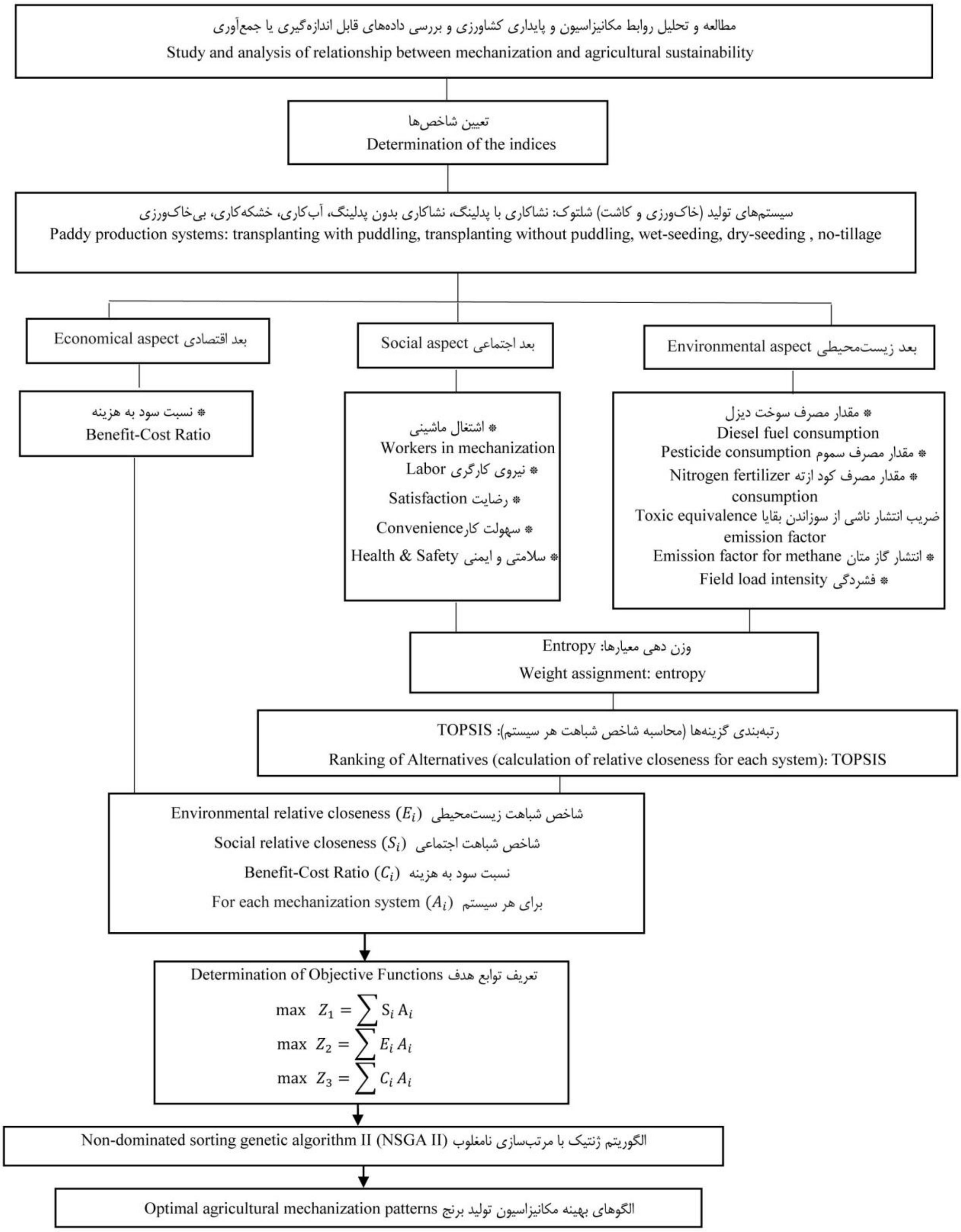
در تحلیل بعد اقتصادی، یکی از شاخص‌های مهم نسبت فایده به هزینه[۴] است که از تقسیم ارزش فعلی فواید به ارزش فعلی هزینه‌ها حاصل می‌شود (Lotfalipour *et al.*, 2007). در بهینه‌سازی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک به دنبال حداکثرسازی این نسبت هستیم.

دو شاخص کمی نیروی انسانی به‌کاررفته در بخش ماشینی و غیر ماشینی و سه شاخص کیفی رضایت، سهولت کار و سلامتی و ایمنی

۱- الگو به‌معنای آرایش و روش انجام کار است که در مقاله بررسی توسعه مکانیزاسیون کشاورزی در کشورهای مختلف دنیا، تعریف آن با شکل انتخاب و توزیع منابع توان کشاورزی و سیستم‌های مکانیزه نشان داده شده است (Kienzle, Ashburner, & Sims 2013).

2- Puddler
3- Cronbach's alpha
4- Benefit- Cost Ratio

به‌عنوان شاخص‌های اجتماعی منظور شدند.



شکل ۱– چارچوب مکانیزاسیون پایدار بهینه تولید برنج در منطقه رامهرمز

Fig.1. Optimal sustainable mechanization framework for rice production in Ramhormoz region, Iran

مقادیر این شاخص‌ها، با استفاده از تکمیل پرسشنامه کشاورزان با نمره‌دهی ۱ تا ۱۰ جمع‌آوری شد و میانگین آن منظور گردید.

برای انتخاب شاخص‌ها در بعد زیست‌محیطی، شش شاخص در مدل قرار داده شدند.

* مقدار مصرف سوخت دیزل: یکی از شاخص‌های منفی کاربرد سیستم‌های مکانیزاسیون است که به‌صورت لیتر در هکتار از روش (Fleming, 2003; Askin & Askin, 2012) و با تصحیح بر گزارش مرکز توسعه مکانیزاسیون کشاورزی (Safari *et al.*, 2014; Rostami *et al.*, 2018) و درخصوص میانگین مصرف سوخت ماشین‌های کشاورزی محاسبه شد.

* مقدار مصرف سموم: با توجه به تفاوت سیستم‌های کشت و بالطبع آن مدیریت آفات، مقدار مصرف سموم شیمیایی متغیر بوده است. این شاخص به‌صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

* مقدار مصرف کود ازته: مقدار مصرف کود ازته نیز به علت تفاوت در مدیریت و نگهداری بقایای کشت قبل از برنج تفاوت داشته. این شاخص به‌صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

* ضریب انتشار گاز متان[1]: پتانسیل گرمایش جهانی[2] (GWP) در تولید (خاک‌ورزی و کاشت) شلتوک با انتخاب سیستم تولید دچار تغییر می‌شود. این انتشار، تأثیر زیادی بر پتانسیل گرمایش جهانی می‌گذارد (Hang *et al.*, 2014). انتشار متان به دو عامل کربن در دسترس خاک و وضعیت رطوبت خاک بستگی دارد و ازآن‌جایی‌که تفاوت بین سیستم‌های تولید شلتوک در این دو عامل است لذا ضریب انتشار این گاز براساس فراتحلیل (Sanchis *et al.*, 2012) انجام شد. این شاخص به‌صورت کیلوگرم متان در هکتار در سال محاسبه شد.

* ضریب انتشار ناشی از سوزاندن بقایا: در منطقه رامهرمز، سوزاندن بقایای کشت قبل (غالباً گندم) و کاه برنج ریخته شده از پشت کمباین همچنان مرسوم است. ضریب انتشار معادل سمی[3] (TEQ) به مقدار ۵/۰ نانوگرم برای هر کیلو بقایای سوخته، محاسبه و در این مطالعه استفاده شده است(Gullett & Touati, 2003).

* شدت بار مزرعه[4]: به‌عنوان شاخصی برای فشردگی خاک به‌کار رفته است (Leiva & Morris, 2001). این شاخص براساس وزن ماشین‌ها و مدت‌زمان عملیات زراعی به‌صورت تن ساعت بر هکتار محاسبه و در ماتریس تصمیم‌گیری قرار داده شد.

وزن‌دهی و رتبه‌بندی

برای وزن‌دهی شاخص‌ها از روش آنتروپی شانون[5] استفاده شد. روش آنتروپی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای محاسبه وزن معیارها می‌باشد. این روش نیازمند به ماتریس معیار–گزینه است. مفهوم این روش در سال ۱۹۴۸ توسط شانون ارائه شد (Shannon, 1948). آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (Lu *et al.*, 2022).

رتبه‌بندی شاخص‌ها و محاسبه شاخص شباهت برای هر سیستم به کمک روش TOPSIS انجام می‌شود Sen & Yang (2012). با استفاده از وزن هر شاخص که در مرحله قبلی محاسبه شد به‌دست می‌آید. منطق زیربنایی این روش، راه‌حل ایده‌آل (مثبت) و راه‌حل ایده‌آل منفی را تعریف می‌کند. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی دارد (Thakkar, 2021). شاخص شباهت[6] هر سیستم مکانیزاسیون محاسبه و به‌عنوان ضریب تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

مدل بهینه‌سازی چندهدفه

در فرآیند بهینه‌سازی، هدف یافتن بهترین جواب از میان چند جواب ممکن برای مسئله است. لذا نیاز است که معیاری برای ارزیابی هر جواب در دسترس باشد. این معیار همان تابع هدف مسئله می‌باشد. متغیرهای تصمیم‌گیری مجموعه پارامترهای ورودی به یک سیستم هستند که با تغییر آن‌ها می‌توان عملکرد آن سیستم را کنترل کرد. کلیه مسائل بهینه‌سازی با محدودیت‌هایی روبه‌رو هستند که ناشی از عوامل مختلفی می‌باشند و قیود مسئله محسوب می‌شوند. یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به شکل کلی زیر تعریف نمود:

$$\begin{aligned}
&Maximize|Minimize \;\; (max|min) \\
&f_m(x) \qquad \forall m \in M \\
&Subject\ to\ (s.t.): \\
&g_i(X) \geq 0 \qquad \forall j \in J \\
&h_k(X) = 0 \qquad \forall k \in K \\
&x_i \in X \qquad \forall i \in n
\end{aligned} \tag{۱}$$

که در آن $x \in R^n$ بردار شامل n متغیر تصمیم‌گیری برای مسئله موردنظر می‌باشد. پاسخ‌هایی که کلیه قیود مسئله را ارضا نمایند فضای تصمیم امکان‌پذیر مسئله $S \subset R^n$ را تشکیل می‌دهند.

در مطالعه حاضر مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[7] (NSGA-II) ارائه شد (Deb *et al.*,2002). توابع هدف تحت مدل NSGA-II در نرم‌افزار

1- Emission Factors for methane
2- Global warming potential
3- toxic equivalence emission factor
4- Field load intensity
5- Shannon’s Entropy
6- Similarity index
7- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

MATLAB (R2019b) برنامه‌نویسی‌شده و بهینه‌سازی چندهدفه انجام گرفت. خروجی آن بهینه پارتو سطوح الگوهای مکانیزاسیون هستند که از منظر پایداری و توابع هدف تعریف‌شده برتری نسبت به هم ندارند. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به‌جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را ارائه می‌دهد که با نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. این الگوریتم یک روش کارآمد به‌منظور حل مسائل با چند تابع هدف است (Mishra *et al.*,2022). ولی به‌منظور انتخاب ذره‌های غالب و پیچیدگی محاسباتی، دارای ضعف‌هایی است. به همین منظور، نسخه دوم الگوریتم NSGA با نام NSGA-II در سال ۲۰۰۰ معرفی شد (Deb *et al.*, 2002). گام‌های این الگوریتم به‌طورکلی عبارتند از: ۱. تولید جمعیت اولیه بر مبنای مقیاس و قیود مسئله؛ ۲. ارزیابی جمعیت تولیدشده باتوجه به توابع هدف؛ ۳. اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب؛ ۴. محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله ازدحامی؛ ۵. انتخاب جمعیت والدین برای تولیدمثل؛ ۶. انجام عملگر تقاطع و جهش. لازم به ذکر است که جهت پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ کروموزم درنظر گرفته شده است. جمعیت شرکت‌کننده در تقاطع[1] برابر ۰/۸ جمعیت اولیه، نرخ جهش[2] ۰/۲ تعیین شده است.

نتایج و بحث

نتایج جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و همچنین وزن‌دهی به شاخص‌های اجتماعی و زیست‌محیطی با روش آنتروپی شانون برای هر بعد به‌صورت دو ماتریس جداگانه در جدول ۱ نمایش داده شده است.

تناقضات اهداف پایداری در سیستم بی‌خاک‌ورزی و نشاکاری با پدلینگ به‌شدت نمایان است. سیستم بی‌خاک‌ورزی با بالاترین امتیاز بعد زیست‌محیطی، پایین‌ترین امتیاز بعد اجتماعی و اقتصادی را دارد. این سیستم مدرن که سه سال است در رامهرمز توسعه پیدا کرده است با چالش‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی روبه‌رو شده است. سطح زیر کشت این سیستم در سال ۱۳۹۹، ۴۳ هکتار بوده است. این سیستم باوجود سرعت و سهولت کاشت و مزایای زیست‌محیطی مستقیم آن، به علت حضور بقایای گندم کشت قبل و محیط گرم و مرطوب کشت، احتمال توسعه قارچ بالا رفته، همچنین به‌علت آبیاری تناوبی، طغیان علف‌های هرز رضایت و سوددهی این سیستم را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. این نکته باعث تضعیف شاخص‌های زیست‌محیطی نیز شده است به‌طوری‌که بیشترین مصرف سموم در این سیستم ثبت شده است (جدول ۱).

بیشترین وزن محاسبه‌شده شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون در جدول ۱ در بین شاخص‌های اجتماعی مربوط به اشتغال ماشینی با مقدار ۰/۶۳۳ است و بعد از آن نیروی انسانی با ۰/۱۵۸ بیشترین مقدار را نشان داده است. این اوزان اهمیت نیروی انسانی به‌کار رفته را در بین شاخص‌های اجتماعی نشان می‌دهد.

در بین شاخص‌های زیست‌محیطی، شدت بار مزرعه و مصرف سوخت بالاترین اوزان به‌ترتیب ۰/۲۷۲ و ۰/۲۶۴ را نشان دادند که به‌طور مستقیم ناشی از کاربرد نهاده ماشین در مزرعه بوده است.

همان‌طور که در جدول ۱ قابل‌مشاهده است نسبت سود به هزینه سیستم بی‌خاک‌ورزی کمتر از ۱ است و حتی اصولاً یک سیستم غیراقتصادی به‌شمار می‌رود. بنابراین با توجه به حساسیت‌های فنی این سیستم توسعه آن نیازمند مشاوره و حمایت فنی دقیق است.

رتبه‌بندی سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج در شهرستان رامهرمز انجام شد. نتایج شاخص شباهت برای هر سیستم در دو بعد اجتماعی و زیست‌محیطی به همراه نسبت فایده به هزینه در جدول ۲ قرار داده شده است. در سیستم‌های خشکه‌کاری و آب‌کاری کاشت به شکل مستقیم انجام می‌شود، اما روش کاشت و آبیاری متفاوتی دارند. این دو سیستم بهترین رتبه اقتصادی را نسبت به سایر سیستم‌ها دارند (جدول ۲). مجموع سطح زیر کشت این سیستم‌ها در سال ۹۹ در رامهرمز، ۴۰۱ هکتار گزارش شده است.

در سیستم خشکه‌کاری کاشت به‌صورت مکانیزه به‌وسیله خطی‌کار صورت می‌گیرد و آبیاری به‌صورت تناوبی انجام می‌شود و نسبت به سایر سیستم‌ها کمترین مصرف آب را در حدود ۲۰/۳ هزار مترمکعب دارد (Hormozi *et al.*, 2016). بزرگ‌ترین چالش این سیستم کنترل علف‌های هرز است که باعث شده مصرف سموم کشاورزی افزایش یابد. در مقابل، به‌علت مصرف کم آب، مکانیزه بودن عملیات کاشت و بازدهی مطلوب توانسته مورد توجه کشاورزان قرار گیرد. در نقطه مقابل آن، سیستم آب‌کاری به علت این‌که از ابتدای کاشت زمین به‌صورت دائم غرقاب است، بالاترین مصرف آب را در حدود ۳۷ هزار مترمکعب در هکتار دارد. عملکرد مطلوب، رضایت و سهولت انجام این سیستم قابل‌توجه است و نیاز به نیروی کارگری کمی دارد. کاهش هزینه‌های کارگری و ماشینی باعث شده این سیستم بالاترین نسبت سود به هزینه را بین سایر سیستم‌ها داشته باشد (جدول ۲).

سیستم‌های نشاکاری بیشترین سطح زیر کشت برنج را در منطقه با ۲۸۶۶ هکتار در سال ۱۳۹۹ دارا هستند. سیستم نشاکاری بدون پدلینگ مرسوم‌ترین سیستم تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج در منطقه است.

1- Crossover
2- Mutation

جدول ۱– مقادیر شاخص‌های پایداری و وزن محاسبه‌شده شاخص‌ها در آنتروپی شانون

Table 1- Values of stability indices and the calculated weight of the indices in Shannon entropy

بعد پایداری **Sustainability**	اقتصادی **Economical**	زیست‌محیطی **Environmental**						اجتماعی **Social**				
سیستم کاشت Planting system	سود به هزینه Benefit-Cost Ratio	شدت بار مزرعه Farm load intensity (tonne h.ha^{-1})	انتشار معادل سمی Toxic Equivalence emission Factor (10^{-9} g)	انتشار متان Emission Factors for methane (kg CH_4 ha^{-1}year^{-1})	مقدار سموم Pesticide consumption (kg.ha^{-1})	مقدار ازت Nitrogen fertilizer (kg.ha^{-1})	سوخت Fuel (L ha^{-1})	اشتغال ماشینی (نفر ساعت در هکتار) Workers in mechanization (man-h.ha^{-1})	نیروی کارگری کل (نفر روز در هکتار) Total labor (man-day.ha^{-1})	سلامتی و ایمنی (بدون واحد) Health & Safety (dimensionless)	سهولت کار Convenience	رضایت Satisfaction
نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling	2.170	24.31	900	160	1.29	97	47.2	5.9	67.5	8	5.5	8.4
نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling	1.935	42.96	900	160	1.26	95	87.2	10.9	55	7.2	6.1	9
خشکه‌کاری Dry-seeding	2.292	30.76	900	82.9	2.28	102	59.2	7.4	43.4	8.1	7.5	8.2
آب‌کاری Wet-seeding	2.807	24.31	900	160	1.52	100	47.2	5.9	36	9.6	8	9.5
بی‌خاک‌ورزی No-tillage	0.714	11.625	400	145.3	2.96	128	25	2.5	48	8.3	8.4	5.8
وزن شاخص Index weight	-	0.272	0.133	0.091	0.217	0.023	0.264	0.633	0.158	0.031	0.088	0.090

جدول ۲– امتیاز رتبه‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون برنج رامهرمز

Table 2- Ramhormoz rice mechanization systems rating score

Sustainability بعد پایداری		**Economical اقتصادی**	**Environmental زیست‌محیطی**	**Social اجتماعی**
سیستم کاشت **Planting system**	**متغیر سیستم** **System variable**	**سود به هزینه** **Benefit-Cost Ratio**	**شاخص شباهت** **Similarity index**	**Similarity شاخص شباهت** **index**
نشاکاری بدون پدلینگ Transplanting without puddling	A1	2.170	0.631	0.416
نشاکاری با پدلینگ Transplanting with puddling	A2	1.935	0.306	0.939
خشکه‌کاری Dry-seeding	A3	2.292	0.413	0.577
آب‌کاری Wet-seeding	A4	2.807	0.618	0.404
بی‌خاک‌ورزیNo-tillage	A5	0.714	0.689	0.066

این سیستم به علت استفاده کم از ماشین‌آلات و سموم از امتیاز بالایی در شاخص‌های زیست‌محیطی به‌دست آورده است (جدول ۲)، البته یکی از دلایل عدم رضایت کشاورزان از این سیستم کارگر بر بودن آن و هزینه‌های بالای کارگری آن است که همگی به‌صورت نقدی پرداخت می‌شود. در تهیه زمین تغییرات زیادی در شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم نشاکاری رخ داده است، که با ورود پادلر شکل گرفته است. تناقضات پایداری سیستم نشاکاری با پدلینگ را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود. این سیستم با بهترین امتیاز بعد اجتماعی، بدترین رتبه را ازنظر زیست‌محیطی نشان داد. در این نوع سیستم گرچه پدلینگ باعث می‌شود مرحله تهیه زمین و نشاکاری با سرعت و رضایت بیشتری انجام شود ولی به‌کارگیری مفرط تراکتور در پدلینگ شاخص‌های زیست‌محیطی به‌ویژه مصرف سوخت و فشردگی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است (جدول ۱).

مدل بهینه‌سازی چندهدفه و محدودیت‌ها

براساس امتیازهای رتبه‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون برنج رامهرمز (جدول ۲)، توابع هدف سه بعد اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی به شکل زیر تعریف گردیدند. به علت این‌که حل مسئله به روش NSGA II با حداقل‌سازی صورت می‌گیرد و ضرایب محاسبه‌شده در TIPSIS مثبت هستند، ضرایب به‌صورت منفی در توابع نوشته شده‌اند.

$$Z1=-(0.416)*A1-(0.939)*A2-(0.577)*A3-(0.404)*A4-(0.066)*A5 \quad (۲)$$

$$Z2=-(0.631)*A1-(0.306)*A2-(0.413)*A3-(0.618)*A4-(0.689)*A5 \quad (۳)$$

$$Z3=-2.170*A1-1.935*A2-2.292*A3-2.807*A4-0.714*A5 \quad (۴)$$

محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی مکانیزاسیون برنج پایدار در منطقه رامهرمز، شامل زمین، آب و ماشین‌های کشاورزی هستند (پارامترها در جدول ۱ تشریح شدند). در سال ۱۳۹۹ مجموعاً ۵۶۴۲ هکتار سطح اراضی کشت تابستانه منطقه رامهرمز بوده، بنابراین حداکثر سطح زیر کشت برنج ۵۶۴۲ به شکل زیر در مدل وارد شد:

$$A1+A2+A3+A4+A5\leq 5642 \quad (۵)$$

در سال ۱۳۹۹ برنامه و محدودیت رهاسازی آب برای کشت برنج در شهرستان رامهرمز درمجموع ۸۳ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. درعین‌حال با برآورد مقدار مصرف سیستم‌های تولید (خاک‌ورزی و کاشت) برنج نشاکاری بدون پدلینگ، خشکه‌کاری، آب‌کاری و بی‌خاک‌ورزی که به‌ترتیب ۳۰/۵، ۲۴/۳، ۲۰/۳، ۳۷ و ۲۳/۶ هزار مترمکعب بوده است (Hormozi *et al.*, 2016)، رابطه (۶) به‌عنوان معادله محدودیت مصرف آب در مدل وارد شد:

$$30500*A1 + 24300*A2 + 20300*A3 + 37000*A4 + 23600*A5 \leq 83000000 \quad (۶)$$

برخی ماشین‌های کشاورزی مانند خطی‌کار غلات، کارنده بی‌خاک‌ورز و پادلر به علت تعداد محدودی که در منطقه وجود دارند به‌عنوان محدودیت ظاهر می‌شوند. توان اجرایی ماشینی یک شاخص سنجش ظرفیت اجرایی میزان عملیات مکانیزه بوده که به‌صورت هکتار برای هر ماشین یا برای مجموعه ماشین‌ها بیان می‌شود (Almassi, Kiani, & Loveimi, 2008). بر این اساس، محدودیت توان اجرایی ماشین‌ها محاسبه شدند و به شکل $A2\leq 600$، $A3\leq 1440$ و $A5\leq 64$ منظور شد.

نتایج بهینه‌سازی

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج شهرستان رامهرمز در جدول ۳ نمایش داده شده است. مجموع سطح سیستم‌های نقاط بهینه در بازه ۲۷۰۰ تا ۳۲۰۰ قرار دارند که این مقدار با سطح زیر کشت برنج در رامهرمز که ۳۳۱۰ هکتار است نزدیک بوده و نشان‌دهنده این است که خروجی مدل با توجه به محدودیت‌های اعمال‌شده نزدیک به واقعیت است. محدودیت ماشین و آب باعث شده است که دو سیستم نشاکاری بدون پدلینگ و خشکه‌کاری از سطوح بالاتری نسبت به سایر سیستم‌ها برخوردار باشند.

در صورتی‌که محدودیت آب نباشد و مدل تحت محدودیت‌های ماشینی فعلی قرار داشته باشد (جدول ۴)، نقاط بهینه مکانیزاسیون با سطوح بیشتر بر سیستم‌های آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ تکیه دارند. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که در شرایط پرآبی و عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی کشت برنج در رامهرمز مطلوب خواهد بود و بالاترین سطح پایداری را خواهند داشت. تحت سیستم‌های آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ، کاربرد نیروی کارگری بیشتر از سایر سیستم‌ها است و تولید محصول بر توان ماهیچه‌ای تکیه دارد. این سیستم‌ها دارای چالش‌های مدیریتی کمتری هستند و کشاورزان بر روش‌های کنترل آفات و آبیاری تسلط بیشتری دارند.

در شرایط کم‌آبی، با در نظر گرفتن ۲۰ میلیون مترمکعب آب (جدول ۵) سیستم‌های بهینه مطلقاً خشکه‌کاری و نشاکاری با پدلینگ را نشان می‌دهند. علت اصلی این‌که در این مدل، سیستم بی‌خاک‌ورزی باوجود مصرف آب کم، در بهینه پارتو سهمی ندارند پایین بودن ضریب سیستم بی‌خاک‌ورزی در تابع هدف اقتصادی (۰/۷۱۴) است. این مسئله با پایین بودن نسبت فایده به هزینه کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۳- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با همه محدودیت‌ها

Table 3- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with all restrictions

نشاکاری بدون پدلینگ **Transplanting without puddling (ha)**	نشاکاری با پدلینگ **Transplanting with puddling (ha)**	خشکه‌کاری **Dry-seeding (ha)**	آب‌کاری **Wet-seeding (ha)**	بی‌خاک‌ورزی **No-tillage (ha)**	سطح زیر کشت **Area under cultivation (ha)**	مصرف آب **Water consumption (m^3)**
1886	166	899	78	12	3041	82962373
1351	316	1275	213	13	3169	82994714
2698	0	1	12	10	2721	82999997
1264	340	1336	235	14	3190	82999995
2527	15	237	12	11	2802	82961626
1276	539	1177	184	13	3188	82999997
2712	0	1	0	11	2724	82999997
2094	65	788	33	12	2992	82952086
1643	237	1057	145	13	3094	82980004
1264	340	1336	235	14	3190	83000000
1618	340	1014	121	12	3106	82979981
1276	539	1177	184	13	3188	82999996
2221	41	629	31	12	2934	82934402
1968	308	712	16	11	3015	82826449
1834	180	935	91	12	3053	82965469
2710	1	1	0	11	2724	82980670
2427	24	364	18	12	2845	82954600
2009	117	813	56	12	3006	82959032

محدودیت‌ها:
۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت
۸۳ میلیون مترمکعب آب
Limitations: 5642 hectares of cultivated area
83 million cubic meters of water

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ
۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری
۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی
600 hectares of power of planting machine with puddling
1440 hectares of operational power of dry-seeding machines
64 hectares of operational power of no-tillage machines

زیرا سیستمی که این نسبت در آن کمتر از یک باشد اقتصادی نیست. البته به علت جدید بودن سیستم و این‌که غالب کشاورزان اولین تجربه آن را داشتند و با حساسیت‌ها و ملاحظات آن آشنایی نداشته‌اند کشت با موفقیت صورت نگرفته و میانگین عملکرد پایینی داشته است. بااین‌حال، درصورتی‌که نسبت فایده به هزینه بر اساس عملکرد کشاورزان موفق سیستم بی‌خاک‌ورزی (۱/۹۶۷) با محدودیت‌های فعلی در مدل وارد شود، سطوح عمده بهینه، سیستم‌های بی‌خاک‌ورزی و خشکه‌کاری خواهند بود.

این بدان معنی است لازمه توسعه کشت پایدار برنج در رامهرمز، تقویت و حمایت سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری و نشاکاری با پدلینگ بوده و نیازمند تمرکز بر سیستم‌های با مصرف آب کمتر هستند که این سیستم‌ها با درجات مکانیزاسیون بالاتر و با کاربرد روش‌های مکانیزه صورت می‌گیرند. در عین حال حمایت از طرح‌های کارشناسی در جهت رفع چالش‌های مدیریت آفات و بیماری‌های سیستم بی‌خاک‌ورزی می‌تواند این سیستم پایدار را در منطقه ترویج دهد.

نتیجه‌گیری

یکی از اساسی‌ترین چالش‌های توسعه مکانیزاسیون شناسایی سیستم‌هایی هست که بهترین تعادل را بین ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی برقرار کرده و در عین دستیابی به بیشترین منافع اقتصادی و اجتماعی، کمترین خسارت زیست‌محیطی را به همراه داشته باشند. به‌کارگیری چارچوب مکانیزاسیون پایدار، نه‌تنها می‌تواند اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کند بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف را نیز به محققان و مجریان بخش کشاورزی می‌دهد. این چارچوب برای پیدا کردن مدل بهینه مکانیزاسیون تمام مراحل خاک‌ورزی، کاشت، داشت، برداشت و پس از برداشت در نواحی جغرافیایی مختلف قابل‌استفاده است. در چارچوب ارائه‌شده شاخص‌های منتخب در سه بعد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مطالعه موردی سیستم‌های مکانیزاسیون تولید شلتوک شهرستان رامهرمز مورد بررسی قرار گرفت. وزن شاخص‌ها با استفاده از آنتروپی شانون محاسبه و شاخص

شباهت هر سیستم در هر بعد پایداری از روش TOPSIS به‌دست آمد. این شاخص به‌عنوان ضرایب توابع هدف سه‌گانه در نظر گرفته شدند. مدل بهینه‌سازی چندهدفه جهت دستیابی به الگوی مکانیزاسیون کشاورزی پایدار با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب NSGA-II به‌کار رفت. نتایج نشان داد مجموع سطوح نقاط بهینه، با سطح زیر کشت واقعی ۳۳۱۰ هکتار برنج در رامهرمز همخوانی دارد. در صورت عدم محدودیت آب، سیستم‌های سنتی آب‌کاری و نشاکاری بدون پدلینگ بهینه هستند و در شرایط خشکسالی و محدودیت شدید آب سیستم‌های مکانیزه نوین مانند خشکه‌کاری، بی‌خاک‌ورزی (با عملکرد مطلوب) و نشاکاری با پدلینگ به‌عنوان سیستم‌های بهینه پایدار خواهند بود. بررسی بهینه پارتو تحت سناریوهای مختلف در محدودیت‌های آب و ماشین نشان داد با به‌کارگیری این چارچوب، نه‌تنها می‌توان اهداف پایداری در شناسایی بهترین سطح‌بندی سیستم‌های مکانیزاسیون را تأمین کرد، بلکه امکان بررسی اثر سناریوهای مختلف تحت محدودیت‌های مختلف نیز وجود دارد.

جدول ٤- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با محدودیت ماشین

Table 4- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with machine restriction

نشاکاری بدون پدلینگ **Transplanting without puddling (ha)**	**نشاکاری با پدلینگ** **Transplanting with puddling (ha)**	**خشکه‌کاری** **Dry-seeding (ha)**	**آب‌کاری** **Wet-seeding (ha)**	**بی‌خاک‌ورزی** **No-tillage (ha)**	**سطح زیر کشت** **Area under cultivation (ha)**	**مصرف آب** **Water consumption (m^3)**
0	0	0	5642	0	5642	208749362
1222	76	82	4259	3	5642	198425726
4572	283	306	469	12	5642	170166224
4470	59	64	1045	5	5642	177823206
4547	0	0	1092	3	5642	179159195
3419	219	237	1749	10	5635	179380325
3500	264	290	1536	10	5600	176107325
1476	222	240	3645	10	5593	190400514
2813	215	134	2472	8	5641	185374613
598	45	49	4943	2	5638	203290491
2318	146	159	3004	6	5633	188763438
2421	276	258	2585	11	5551	181679059
1720	66	71	3781	3	5642	195499081
5466	49	29	62	5	5611	170895987
0	0	0	5641	1	5642	208744350
5639	0	0	0	3	5642	172058983
2095	130	140	3271	6	5642	191060368
4119	259	282	954	11	5626	173227704

محدودیت‌ها:
۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت
Limitations: 5642 hectares of cultivated area

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ
۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری
۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی
600 hectares of power of planting machine with puddling
1440 hectares of operational power of dry-seeding machines
64 hectares of operational power of no-tillage machines

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهید چمران اهواز و حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.AA99.585) و از آقای دکتر مهدی شریف یزدی، عضو هیات علمی مدرسه بازرگانی نروژ بابت همکاری در تحلیل نتایج تشکر و قدردانی می‌کنند.

جدول ۵- جواب‌های بهینه پارتو سیستم‌های مکانیزاسیون پایدار برنج رامهرمز- با همه محدودیت‌ها (خشک‌سالی)

Table 5- Pareto optimal solutions of sustainable rice mechanization systems in Ramhormoz- with all restrictions (drought)

نشاکاری بدون پدلینگ **Transplanting without puddling (ha)**	نشاکاری با پدلینگ **Transplanting with puddling (ha)**	خشکه‌کاری **Dry-seeding (ha)**	آب‌کاری **Wet-seeding (ha)**	بی‌خاک‌ورزی **No-tillage (ha)**	سطح زیر کشت **Area under cultivation (ha)**	مصرف آب **Water consumption (m^3)**
0	270	662	0	0	932	19999989
0	171	779	0	1	951	19997295
0	148	806	0	1	955	19985138
0	14	966	0	1	981	19988213
0	59	911	0	2	972	19980398
0	182	766	0	1	949	19999967
0	0	982	0	3	985	19999993
0	0	984	0	0	985	19999994
0	212	731	0	0	943	19993736
0	118	843	0	0	961	19995990
0	34	944	0	0	978	19999990
0	134	823	0	1	958	19939460
0	160	793	0	0	953	19990671
0	69	902	0	0	971	19997817
0	235	703	0	0	939	19998322
0	89	876	0	2	967	19999552
0	38	938	0	1	977	19989284
0	269	663	0	0	932	19992559

۶۰۰ هکتار توان اجرایی ماشینی نشاکاری با پدلینگ
۱۴۴۰ هکتار توان اجرایی ماشینی خشکه‌کاری
۶۴ هکتار توان اجرایی ماشینی بی‌خاک‌ورزی
600 hectares of power of planting machine with puddling
1440 hectares of operational power of drying machines
64 hectares of operational power of no-tillage machines

محدودیت‌ها:
۵۶۴۲ هکتار سطح زیر کشت
۲۰ میلیون مترمکعب آب
Limitations: 5642 hectares of cultivated area
20 million cubic meters of water

References

1. Almassi, M., Kiani, S., & Loveimi, N. (2008). *Principles of agricultural mechanization*. Jungle Publication, Tehran, Iran, 308 p. (In Persian)
2. Askin, D., & Askin, V. (2012). Financial budget manual 2012. Lincoln University. Faculty of Commerce, p.
3. Banerjee, S., & Punekar, R. M. (2020). A sustainability-oriented design approach for agricultural machinery and its associated service ecosystem development. *Journal of Cleaner Production, 264*, 121642. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121642
4. Bezruk, Y., Lavèn, P., Hoffmann, C., & Doluschitz, R. (2014). Sustainability in agricultural machinery production-an empirical study among farmers. *Landtechnik, 69*, 84-89.
5. Bochtis, D., Sørensen, C. A. G., & Kateris, D. (2019). *Choosing a Machinery System*. In: Bochtis, D., Sørensen, C.A.G., Kateris, D. (Eds.), O*perations Management in Agriculture*, 117-158. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809786-1.00005-9
6. Bochtis, D. D., Sørensen, C. G., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering*, *126*, 69-81. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012
7. Camarena, E., Gracia, C., & Sixto, J. C. (2004). A mixed integer linear programming machinery selection model for multifarm systems. *Biosystems Engineering*, *87*, 145-154. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.10.003
8. Corti, D., Granados, M. H., Macchi, M., & Canetta, L. (2013). *Service-oriented business models for agricultural machinery manufacturers: Looking forward to improving sustainability*. In: (Eds.), Proceeding of International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE) & IEEE International Technology Management Conference, pp. 1-8. https://doi.org/10.1109/itmc.2013.7352612
9. Cupiał, M., & Kowalczyk, Z. (2020). Optimization of Selection of the Machinery Park in Sustainable Agriculture.

Sustainability, *12*, 1380. https://doi.org/10.3390/su12041380
10. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *6*, 182-197. https://doi.org/10.1109/4235.996017
11. Emami, M., Almassi, M., & Bakhoda, H. (2018). Agricultural mechanization, a key to food security in developing countries: strategy formulating for Iran. *Agriculture & Food Security*, *7*, 24.
12. FAO. (2022). Sustainable Agricultural Mechanization. http://www.fao.org/sustainable-agricultural-mechanization.
13. Fleming, P. H. (2003). Farm technical manual.
14. García-Alcaraz, J., Maldonado-Macías, A., Hernández-Arellano, J., Blanco-Fernández, J., Jiménez-Macías, E., & Sáenz-Díez Muro, J. (2016). Agricultural tractor selection: a hybrid and multi-attribute approach. *Sustainability*, *8*, 157. https://doi.org/10.3390/su8020157
15. Gathorne-Hardy, A. (2016). The sustainability of changes in agricultural technology: The carbon, economic and labour implications of mechanisation and synthetic fertiliser use. *Ambio*, *45*, 885-894. https://doi.org/10.1007/s13280-016-0786-5
16. Gullett, B., & Touati, A. (2003). PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue. *Atmospheric Environment*, *37*, 4893-4899. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.08.011
17. Hang, X., Zhang, X., Song, C., Jiang, Y., Deng, A., He, R., Lu, M., & Zhang, W. (2014). Differences in rice yield and CH_4 and N_2O emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China. *Soil and Tillage Research*, *144*, 205-210. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.013
18. Hormozi, M., Abdeshahi, A., Asoodar, M., & Baruah, D. (2016). Energy use pattern of paddy production systems in khuzestan province, Iran. *Iran Agricultural Research*, *35*, 47-56. (In Persian).
19. Hormozi, M. A., Asoodar, M. A., & Abdeshahi, A. (2012). Impact of mechanization on technical efficiency: A case study of rice farmers in Iran. *Procedia Economics and Finance*, *1*, 176-185.
20. Keshvari, A., & Marzban, A. (2019). Prioritizing the Power Arrival in Khuzestan Province Agriculture using FAHP and FTOPSIS. *Journal of Agricultural Machinery*, *9*(1), 235-251. (In Persian).
21. Kiani, F., Randazzo, G., Yelmen, I., Seyyedabbasi, A., Nematzadeh, S., Anka, F. A., Erenel, F., Zontul, M., Lanza S., & Muzirafuti, A. (2022). A Smart and Mechanized Agricultural Application: From Cultivation to Harvest. *Applied Sciences*, *12*. https://doi.org/10.3390/app12126021
22. Kienzle, J., Ashburner, J. E., & Sims, B. (2013). Mechanization for rural development: a review of patterns and progress from around the world. *Integrated Crop Management*, *20*.
23. Koritz, K. (2014). *Optimization in a system of systems: Minimizing a farm's environmental impact through operational efficiency*. Master Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
24. Leiva, F., & Morris, J. (2001). PH—Postharvest Technology: Mechanization and Sustainability in Arable Farming in England. J*ournal of Agricultural Engineering Research*, *79*, 81-90. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0686
25. Lotfalipour, M. R., & Eslami Gisaki, S. (2007). Evaluation of Cost- Benefit and Sensitivity Analysis of Sarcheshmeh Copper Complex. *Journal of Quantitative Economics*, *4*, 83-99. (In Persian).
26. Lu, H., Zhao, Y., Zhou, X., & Wei, Z. (2022). Selection of agricultural machinery based on improved CRITIC-entropy weight and GRA-TOPSIS method. *Processes*, *10*(2), 266. https://doi.org/10.3390/pr10020266
27. Mishra, D., & Satapathy, S. (2022). Sustainability-assessment for farm-machinery. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
28. Mishra, D., Satapathy, S., & Chatterjee, P. (2022). *Soft Computing and Optimization Techniques for Sustainable Agriculture*. De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110745368
29. Romanelli, T. L., & Milan, M. (2012). Machinery management as an environmental tool-material embodiment in agriculture. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *14*, 63-73.
30. Rostami, S., Lotfalian, M., & Hosseinzadeh Samani, B. (2018). Assessment and Comparison of Conventional and Straw Walker Combines Harvesting Losses in Fars Province. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, *19*, 85-96.
31. Safari, M., Alizadeh, M. R., & Gerami, K. (2014). Comparison of Three Conventional Rice Combine Harvesters in Mazandaran, Iran. J*ournal of Agricultural Engineering Research*, *14*, 73-86.
32. Sanchis, E., Ferrer, M., Torres, A. G., Cambra-López, M., & Calvet, S. (2012). Effect of Water and Straw Management Practices on Methane Emissions from Rice Fields: A Review Through a Meta-Analysis. *Environmental Engineering Science*, *29*, 1053-1062. https://doi.org/10.1089/ees.2012.0006
33. Sen, P., & Yang, J. B. (2012). *Multiple criteria decision support in engineering design*. Springer Science & Business Media, 207 p.
34. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*, 379-423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
35. Sims, B., Hilmi, M., & Kienzle, J. (2016). Agricultural mechanization: a key input for sub-Saharan Africa smallholders. Integrated Crop Management (FAO) eng v. 23 (2016).
36. Sims, B., & Kienzle, J. (2016). Making mechanization accessible to smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Environments*, *3*, 11-37. https://doi.org/10.3390/environments3020011

37. Thakkar, J. J. (2021). Multi-Criteria Decision Making (Vol. 336, pp. 1-365). Springer.
38. Zhou, Q., Lou, J., Xie, F., & Liu, Q. (2011). The method research on optimum selection of agricultural machinery. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 5* 337-334.